0254-6124/2015/35(4)-453–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zou Xu, Yang Guotao, Wang Jihong, Gong Shaohua, Cheng Xuewu, Jiao Jing, Yue Chuan, Fu Haichuan, Wang Zishuo, Yang Song, Yang Xianchang, Fu Jun. Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at Beijing (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(4): 453-460, doi:10.11728/cjss2015.04.453

北京地区重力波活动及其波谱的季节分布特性研究*

邹 旭[1,2] 杨国韬[1] 王继红[1] 龚少华[2] 程学武[3] 焦 菁[1]
岳 川[1] 付海川[2] 王梓硕[2] 杨 松[2] 羊现长[2] 傅 军[2]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(海南师范大学物理与电子工程学院 海口 571158)

3(中国科学院武汉物理与数学研究所 武汉 430071)

摘 要 利用激光雷达对北京地区上空 Na 层进行持续观测, 通过连续三年累积的夜间观测数据对北京地区重力波活动及其波谱进行研究. 根据重力波的线性理论计算, 得到北京地区上空的大气密度扰动规律、空间功率谱和时间频率谱. 通过选择重力波波长在 1∼8 km, 具有特定波长以及特定周期为 60, 45, 25 min 的重力波活动辅助研究重力波的季节变化规律, 结果表明北京地区重力波大气密度扰动具有夏季大、冬季小的活动规律. 结合波源与背景风场的季节性变化规律, 分析得出北京上空重力波活动季节性变化的主要原因为青藏高原地形和对流因素与我国北方地区季节性背景风场共同作用的结果.

关键词 激光雷达, Na 层, 重力波, 季节分布, 青藏高原地形及对流

中图分类号 P 351

Gravity Wave Parameters and Their Seasonal Variations Derived from Na Lidar Observations at Beijing

ZOU Xu[1,2] YANG Guotao[1] WANG Jihong[1] GONG Shaohua[2]
CHENG Xuewu[3] JIAO Jing[1] YUE Chuan[1] FU Haichuan[2]
WANG Zishuo[2] YANG Song[2] YANG Xianchang[2] FU Jun[2]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou* 571158)

3(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430071)

Abstract The nightly and seasonal variability of gravity wave activity and spectra in the mesopause

* 国家自然科学基金项目 (NSFC40905012, 41174129, 41474130), 中国博士后基金项目 (2012M520397), 海南省自然科学基金项目 (513146) 和中国科学院国家空间科学中心重点培育项目共同资助

2014-05-23 收到原稿, 2015-05-21 收到修定稿

E-mail: gtyang@spaceweather.ac.cn

over Beijing are studied with 3 years of sodium lidar observations. From the linear layer density response to gravity wave forcing, the lidar data were analyzed to get the atmospheric density perturbations and their spectra. The atmospheric density perturbation, density variance for fluctuations with vertical scales between 2 and 10 km, and amplitudes of density perturbation spectra at $m = 2\pi/8$, $2\pi/4$, $m = 2\pi/1.5$, $m = 2\pi/1$, and $\omega = 2\pi/60$, $\omega = 2\pi/40$, $2\pi/25$ all exhibit large nightly variability as well as large seasonal variations, with the semiannual maxima occurring near the solstice. The mean RMS atmospheric density perturbation over Beijing are 5.8%, which are obviously larger in summer than that in winter and the maxima occur near the solstice. The m spectra show power law shapes, and their range of variation is between -1.97 and -3.67 with an annual mean value of -3.02, and ω spectra is between -1.06 and -2.08 with an annual mean value of -1.92, respectively. It is concluded that the reaction of the Qinghai-Tibet Plateau and the background wind may be the main reason of the gravity wave behaviors at Beijing.

Key words Lidar, Na layer, Gravity wave, Seasonal variations, Topography of Qinghai-Tibet Plateau and convection

0 引言

作为中高层大气中最重要的动力学过程之一, 近年来重力波在中高层大气研究领域得到广泛关注. 对重力波而言, 由于其可将能量和动量从波源传输到中高层大气, 对中高层大气的循环、结构、组成都有重大影响, 有助于深入理解大气的大尺度循环动力学行为. 研究重力波的产生及其在耗散和传播过程中的动力学规律, 是当今中高层大气研究的重要内容, 对于深入研究全球大气能量收支以及能量和动量平衡过程有着重要意义.

激光雷达是研究重力波的有效手段, 通过地面发射激光对大气进行主动探测, 近年来在重力波研究领域得到了广泛应用. She 等 [1] 利用测温激光雷达对美国 Colorado 地区中层顶区的重力波活动展开了观测研究; Gardner 等 [2−5] 基于 CEDAR 观测了北美地区重力波活动, 提取出重力波活动数据, 并总结了 Urbana 地区的重力波活动行为; Yang 等 [6] 基于巴西激光雷达观测数据报道了南半球重力波季节变化具有与北半球完全不同的活动规律等. 目前普遍认为, 重力波的产生和传播与观测地所处地理位置有着极其密切的关系. 为更清楚地研究重力波的产生及其传播特性, 有必要在全世界多地范围内展开联合观测研究. 同时, 持续进行长时间的观测数据积累有助于获得更加丰富的重力波参数统计信息, 从而更好地研究其变化规律. 这对深入理解重力波的行为特性是十分必要的.

本文利用子午工程钠荧光激光雷达 2009−2012 年在中国北京延庆观测台站获取的 Na 层观测数据, 对北京地区重力波活动规律进行了研究. 通过分析北京地区上空大气密度扰动、空间功率谱、时间频率谱以及特定波长和频率的重力波活动行为, 得出北京地区大气密度扰动的季节变化规律, 并结合中国地形以及背景风场的季节性变化, 分析了北京上空重力波活动季节性变化的原因.

1 数据与讨论

1.1 实验设备

子午工程激光雷达北京延庆台站的观测设备为双波长激光雷达, 波长分别为 532 nm 和 589 nm. 所用的钠荧光激光雷达数据采用染料激光器进行激发, 产生 589 nm 的激光探测光束 (能量 30 mJ), 重复频率为 30 Hz. 接收望远镜参数为: 主镜直径 1000 mm, 发射激光光束距离接收望远镜中心 6 m, 望远镜视场通常设置为 2 mrad, 接收信号通过带宽 1nm 的带通光学滤光片、致冷光电倍增管、前置放大器和时间分辨的光子计数器进行信号探测与放大, 最终由计算机处理收集的数据.

每个激光雷达文件由 5000 个激光脉冲累积, 高度分辨率为 96 m, 时间分辨率约为 167 s. Na 层密度可由这些原始激光雷达回波数据得到 [7].

1.2　数据处理

利用钠激光雷达进行 Na 层数据提取是通过 Na 层激光雷达研究重力波的关键. 本文采用 Yang 等 [6,8−9] 改进的 Na 层数据提取方法, 通过对当天 Na 密度进行处理, 求解得到本底 Na 层密度, 进而计算 Na 层密度扰动. Na 层扰动与大气密度扰动关系为

$$r_{\mathrm{s}}(z,t)=-\frac{1}{\gamma-1}\Big[1-\frac{\gamma H(z-z_0)}{\sigma_0^2}\Big]r_{\mathrm{a}}(z,t). \qquad (1)$$

式中, $r_{\mathrm{s}}(z,t)$ 为 Na 层密度扰动, $r_{\mathrm{a}}(z,t)$ 为大气密度扰动, z 和 t 分别代表实时观测到的 Na 层高度及观测时间, σ_0 为未扰动 Na 层的平均厚度, 约为 4.5 km, z_0 为钠层中心高度. 通常在距离地表 94±2 km 高度处, Na 层密度较大且随重力波的传播变化剧烈. 因此, 在提取重力波参数时将这一部分 Na 层密度数据丢弃. 最终大气密度扰动可利用

$$r_{\mathrm{a}}(z,t)=-\frac{\gamma-1}{1-\gamma Hf'(z)}r_{\mathrm{s}}(z,t) \qquad (2)$$

计算. 式中, $f'(z)=-\rho_0(z)/\rho_0'(z)$, 即本底 Na 层密度与本底钠层密度微分之比.

对大气密度扰动进行全天时和全空间平均化处理, 得到大气密度的均方根值, 即

$$\langle r_{\mathrm{a}}^2(t)\rangle=\frac{1}{TL'}\int_{z_0-L/2}^{z_0+L/2}\int_{t-T/2}^{t+T/2}r_{\mathrm{a}}^2(z,t)\mathrm{d}t\mathrm{d}z. \qquad (3)$$

式中, L' 为舍弃位于 94±2 km 处非高斯分布 Na 层厚度后的总宽度值, T 为当天的总观测时间. 通过子午工程北京延庆站累积的 2009−2012 年共 173 天有效观测数据, 经上述过程反演并平均化求得北京地区大气密度扰动季节分布值. 将所有统计数据进行最小均方误差 (MMSE) 拟合后得出北京地区大气密度扰动的年度季节变化规律, 如图 1 所示.

图 1 给出的是北京地区大气密度扰动年度均方根分布, 大气扰动拟合参数列于表 1. 实验数据表明, 年度大气密度扰动平均值为 5.83%, 并且夏季的大气密度扰动显著高于其他季节. 全年扰动贡献值为 0.98%, 优于半年扰动贡献 0.72%, 分别占全年平

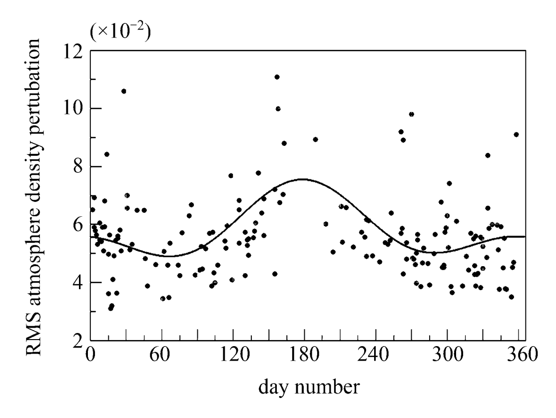


图 1　北京地区大气密度扰动年度均方根分布 (圆点代表大气密度扰动的均方根数据, 黑色曲线表示经 MMSE 拟合的大气扰动谱线)

Fig. 1　Seasonal variations of the RMS atmospheric density perturbations (Circles represent the RMS atmospheric density perturbations and the solid curve represents the MMSE fitting of the RMS atmospheric density perturbations)

表 1　重力波拟合参数年度及半年度贡献值

Table 1　Annual and semiannual components of gravity wave parameters

	A_0	A_1	A_2	d_1	d_2	A_1/A_0	A_2/A_0	d_1-d_2
$\langle r_{\mathrm{a}}^2\rangle^{1/2}/(\%)$	5.84	0.98	0.72	181	188	0.16	0.12	−7
$E_{\mathrm{m}}/(\%)^2$	5.13	1.85	1.37	198	179	0.36	0.26	19
$F_{\mathrm{a}}(m_8)/(\mathrm{m{\cdot}cycle^{-1}})$	4.47	1.69	1.21	193	187	0.39	0.27	6
$F_{\mathrm{a}}(m_4)/(\mathrm{m{\cdot}cycle^{-1}})$	1.20	0.58	0.34	197	187	0.48	0.28	10
$F_{\mathrm{a}}(m_{1.5})/(\mathrm{m{\cdot}cycle^{-1}})$	0.61	0.376	0.207	193	188	0.61	0.34	5
$F_{\mathrm{a}}(m_1)/(\mathrm{m{\cdot}cycle^{-1}})$	0.013	0.008	0.0045	190	194	0.60	0.33	−4
$F_{\mathrm{a}}(\omega_{60})/(\mathrm{s{\cdot}cycle^{-1}})$	1.34	0.786	0.67	174	193	0.59	0.50	−19
$F_{\mathrm{a}}(\omega_{45})/(\mathrm{s{\cdot}cycle^{-1}})$	0.761	0.51	0.37	180	188	0.67	0.49	−8
$F_{\mathrm{a}}(\omega_{15})/(\mathrm{s{\cdot}cycle^{-1}})$	0.124	0.093	0.052	179	186	0.75	0.41	−7

注　重力波参数方程 $y=A_0+A_1\cos[2\pi/365(d-d_1)]+A_2\cos[4\pi/365(d-d_2)]$.

均扰动的 16% 和 12%. 大气密度扰动的最低值出现在春分和秋分日前后. 总体呈现夏季大, 冬季小的分布态势.

与文献对比可知, 本文结果与 Senft 等报道的美国 Urbana 地区 (56°W, 45°N) 大气密度扰动的季节规律类似 [2]. 其中 Urbana 地区大气密度扰动的平均值为 5.6%, 与本文数值十分接近. 并且都是在夏季扰动幅度最大, 而春秋分时出现扰动极小值.

2 重力波参数拟合值

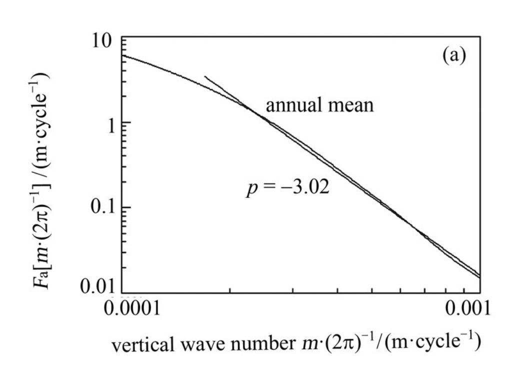
研究重力波场能量在各个垂直波数或频率上的相对分布, 可以计算出重力波的垂直波数谱和时间频率谱. 其中, 垂直波数谱 (功率谱) 可采用自相关函数法进行计算, 有

$$F_{\rm a}(m)=\int_{-\infty}^{\infty}B_{\rm a}(s,0){\rm e}^{{\rm i}ms}{\rm d}s=\int_{-\infty}^{\infty}\langle r_{\rm a}(z,t)r_{\rm a}(z-s,t)\rangle{\rm e}^{{\rm i}ms}{\rm d}s.$$

式中, 大气密度扰动的自相关函数等于 $\langle r_{\rm a}(z,t)r_{\rm a}(z-s,t)\rangle$, 可以用 $B_{\rm a}(s,0)$ 表示, 其中 s 为两个采样的高度差值. 根据 Tsuda 等 [10] 的处理方法, 先对大气密度扰动进行预白噪声化处理, 预白噪声化函数 $y(z,t)=r_{\rm a}(z,t)-0.95r_{\rm a}(z-\Delta z,t)$; 再对其进行加 Hamming 窗修正后, 经傅里叶变换即可得到北京地区每一单天事件的波数谱 $F_{\rm a}(m)$. 同时计算出重力波在各个垂直波长分布的谱斜率 p 及其年均统计分布. 通过对所有单天事件的波数谱曲线进行平均化处理, 得到年平均的谱斜率 $p=-3.02$, 如图 2(a) 所示. 这与 Dewan 和 Good[11] 提出的线性不稳定理论和 Hines[12] 提出的多普勒扩散理论预测的 $p=-3$ 符合得非常好. 垂直波数谱斜率的季节性统计分布规律如图 2(b) 所示. 其中最缓的斜率为 -1.96, 最陡的斜率为 -3.67. Senft 和 Gardner[2] 提出的斜率值在 -2.20~-3.55 内, 变化范围比本文小. Senft 等 [13] 利用一个月的数据研究了最缓斜率为 -2.1 的波事件, 其结果相对接近本文, 而其最大值 -3.5 低于北京地区的观测值. 其他例如 Collins 等 [14] 得到的南极地区功率谱斜率范围为 -2.0~-3.5, 也与本文结果比较接近.

大气密度方差 $E_{\rm m}$ 是反映大气重力波扰动的一个有效参量, 波长低于 10 km 的重力波可以反映出宽为 20 km Na 层的可靠信息. 本文定义的 $E_{\rm m}$ 是通过选取波长范围在 1~10 km, 并对 $F_{\rm a}(m)$ 进行积分得到的, 如图 3 所示, 北京地区 $E_{\rm m}$ 最大值为 24×10^{-4}, 最小值 0.11×10^{-4}, 全年平均值为 4.7×10^{-4}, $E_{\rm m}$ 最大值发生在夏季的夏至点时, 半年度和年度贡献值分别为 1.85×10^{-2} 和 1.37×10^{-2}, 其全年及半年变化值约占全年波动的 36% 和 26%, 均小于 Senft 和 Gardner[2] 报告的 45% 和 44%. 如图 3 所示, 北京地区大气密度扰动的 $E_{\rm m}$ 季节分布规律与均方根值分布规律大体一致, 夏季的大气密度扰动显著高于其他季节, 最低值出现在春分及秋分日前后. 其中秋分日时的扰动更强一些.

通过对波长为 1, 1.5, 4, 8 km 的重力波活动强度进行研究, 给出了其年度分布规律 (见图 4). 上述波长范围在 1~8 km 的特征波长垂直波数谱的季节变化特性与大气密度扰动的季节变化特性一致. 如图 4 所示. 分别用 $m_8=2\pi/8$, $m_4=2\pi/4$, $m_{1.5}=2\pi/1.5$, $m_1=2\pi/1$ 来代表. 由图 4 和表 1 可以看到, m_8 的年



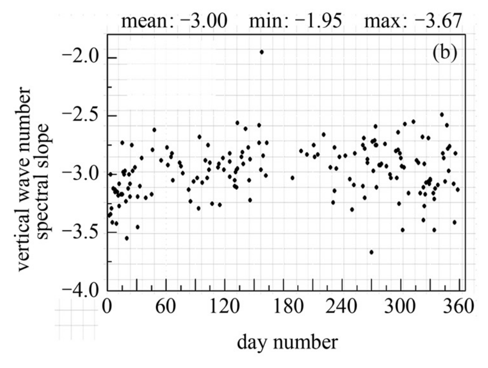


图 2 垂直波数谱的年度平均谱 (a) 和垂直波数谱斜率 (b) 的统计分布

Fig. 2 Distribution of annual mean of vertical wave number spectra (a) and the spectrum slopes (b)

度平均值为 4.47 m·cycle^{-1}, 远小于 Senft 等 [2] 提出的 12.5 m·cycle^{-1}, 仅为其 36%. 年度和半年度振幅分别占全年平均的 39%, 27%. m_4 的年度平均值是 1.20 m·cycle^{-1}, 全年变化的相对振幅是 48%, 半年值为 28%. $m_{1.5}$, m_1 为小波长重力波扰动, 全年平均值分别为 0.61 和 0.013 m·cycle^{-1}, 其全年相对振幅很高, 均达到 60% 以上, 远高于其余尺度波长扰动比例. 值得注意的是, 所有波长的波动行为均是全年振幅比例高于半年振幅比, 其相位也出现在一年的中间时, 即夏至点附近. 这一结论与前文所述大气密度扰动、波数谱扰动方差的季节分布规律均符合得很好.

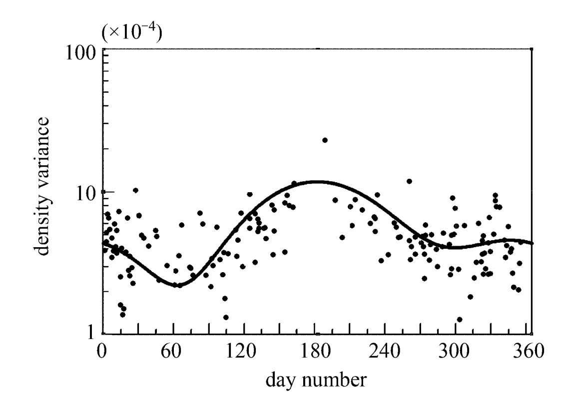


图 3　北京地区大气密度方差 E_{m} 年度分布

Fig. 3　Seasonal distribution of density perturbation variance for fluctuations

时间频率谱

$$F_{\mathrm{a}}(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty}\langle r_{\mathrm{a}}(z,\omega)r_{\mathrm{a}}(z-s,\omega)\rangle \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega z}\mathrm{d}z$$

也是研究重力波扰动的重要参量. 与大气扰动的垂直功率谱相似, 在对大气密度扰动进行漂白及加窗处理后, 通过傅里叶变换得到所有单天事件的频率谱 $F_{\mathrm{a}}(\omega)$. 通过计算谱斜率 q 及其年均统计分布发现, q 的分布范围为 $-1.06\sim-2.80$, 平均值为 -1.92 (见图 5). Gardner 等 [2] 得出的北美地区当地值为 -1.92, Beatty 等 [15] 观测到的 Arecibo 地区值为 -1.85, 本文结果与上述结果均较为接近, 并接近于理论预测值 $-5/3$.

通过对波动周期分别为 60, 40, 25 min 的重力波活动的季节变化研究, 给出了其年度分布规律, 如图 6 所示. 由图 6 和表 1 可以看到, ω_{60}, ω_{40}, ω_{25} 的年度平均值分别为 1.34, 0.76, 0.12 s·cycle^{-1}, 其波动行为均是全年振幅比例要高于半年振幅比, 相位也出现在夏至点附近. 这说明上述频率范围在 $2\pi/60\sim2\pi/25$ 的特定波长的垂直波数谱季节变化特性与大气密度扰动的季节变化特性一致.

研究结果显示, 北京地区的重力波季节变化特性, 例如大气密度扰动、密度扰动方差、8 km 和 60 min 以下范围的垂直功率谱及时间频率谱, 均呈现夏季大而冬季小的季节变化规律. 这一结果与 Gong 等 [16] 报道的重力波事件的出现频率相吻

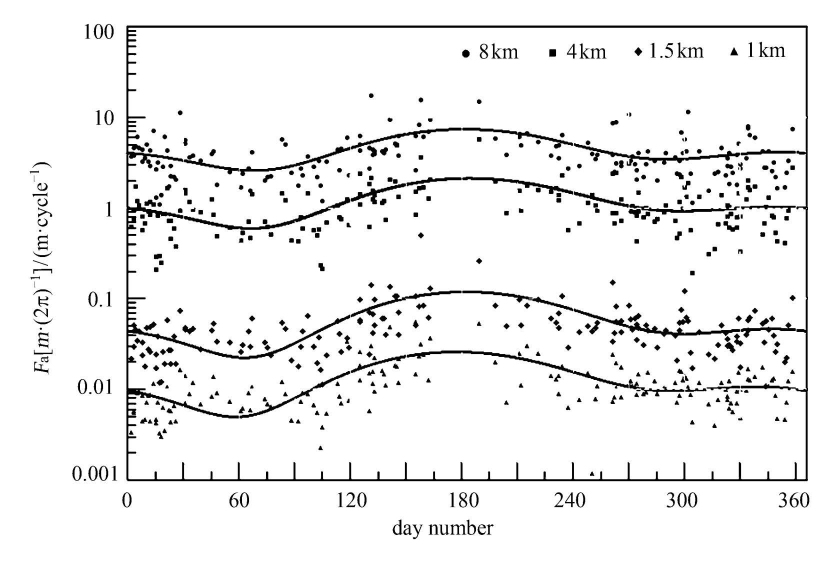


图 4　不同波长重力波垂直波数的季节变化规律

Fig. 4　Seasonal vibrations of vertical wave number spectral amplitudes

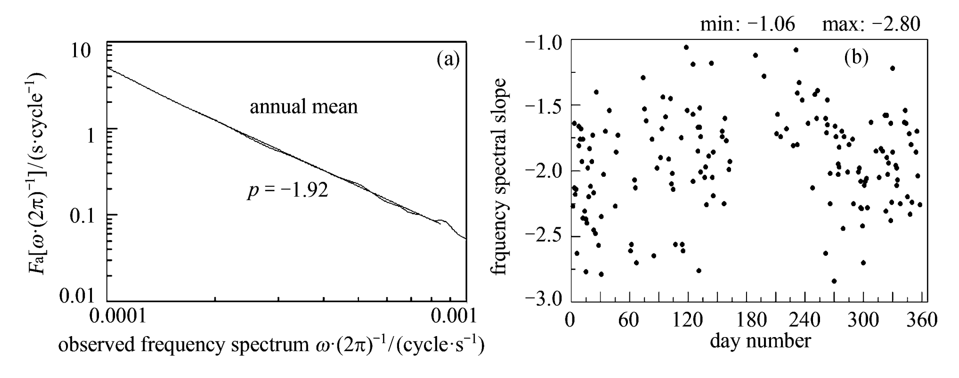


图 5 时间频率谱的年度平均谱 (a) 和时间频率谱斜率 (b) 统计分布

Fig. 5 Distribution of annual mean of temporal frequency spectra (a) and the spectrum slopes (b)

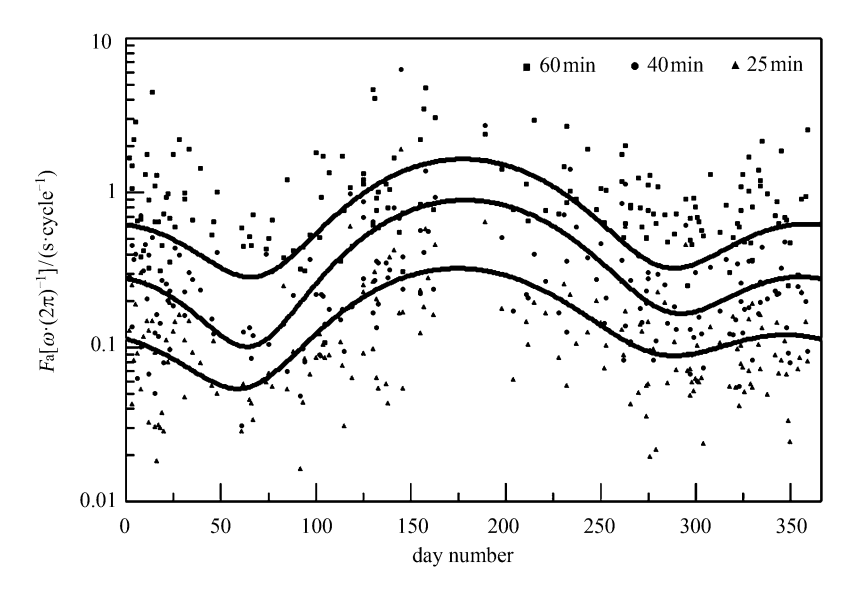


图 6 不同频率的重力波垂直频率季节变化分布

Fig. 6 Seasonal vibrations of temporal frequency spectral amplitudes

合. 文献研究表明, 地形和对流作用是产生重力波的主要因素 [17−23]. Wan 等 [24] 和 Xu 等 [25] 在基于广泛的 HF Doppler 阵列观测基础上报道了青藏高原上的对流和地形波是中国中部地区上空大气中尺度重力波的主要波源, 而中层大气中观测到的重力波主要来自 20 km 以下的低层大气, 并且大气对流是重力波中常见的主要波源. 北京地区地处中国北方, 对流层温度夏季较高而冬季较低. 因此在夏季, 对流强度和频度都是一年中最大的; 而在冬季, 对流强度和频度则是一年中最小的. 也就是说, 波源的强度和频度在一年中夏季最大而冬季最小.

另外, 根据 Gong[16] 基于 HWM93* 描绘出的中国北方地区水平风场模型 [16] 并辅助结合 Zhang 和 Yi[26] 基于 Radiosonde 描绘的北京地区对流层风场的变化规律, 可以看出中国北方背景风场的季节变化, 尤其是水平纬向风场的季节变化, 具有明显的半年对称性 (水平经向风比水平纬向风小得多, 水平经向风对重力波活动的影响比较弱. 因此在分析背景风场的影响时, 只考虑了纬向风的作用). 在春季和夏季, 中国北方上空纬向风为西向风, 这一季节的背景大气对向东北方向传播的重力波的吸收、耗散作用较弱; 而秋季和冬季纬向风为东向风, 由于 Doppler 效应, 此时背景大气对重力波的滤波效应最强. 由此可知, 在背景风场方向与重力波水平传播方向一致的季节, 由于背景大气的吸收和耗散效应使得大部分重力波消失于大气中, 雷达观测到的大气重力波扰动较

*http://modelweb.gsfc.nasa.gov/

小; 在背景风场方向与重力波传播方向相反的季节, 背景大气对重力波的吸收与耗散作用较小, 重力波引起的大气密度扰动很大. 因此重力波扰动在夏季出现最大值, 而冬季观测到的重力波大气扰动则相对较弱. 从冬季到夏季, 由于对流引起的波源强度和频度随着时间变化而逐渐增强, 地面附近的大气温度也随时间变化而逐渐升高, 导致重力波的扰动强度增大. 同时, 中国上空纬向风逐渐由东向风变为西向风, 背景大气对传播的重力波的阻碍作用逐渐减弱; 相反, 从夏季到冬季, 由于对流引起的波源强度和频度随时间变化而逐渐减弱, 地面附近的大气温度也随着时间变化而逐渐降低, 大气扰动的强度也因之减弱. 与此同时, 中国上空的纬向风逐渐由西向风变为东向风, 背景大气对传播的重力波的阻碍作用逐渐增强, 导致秋冬季节观测到的大气密度扰动相对较弱.

基于以上分析认为, 北京地区上空重力波活动季节性变化的主要原因是青藏高原的地形及对流因素与背景风场的季节性变化共同作用的结果. 从冬季到夏季, 雷达观测的重力波扰动强度不断增大; 从夏季到冬季, 可观测到的重力波活动强度越来越弱. 也就是说, 从冬季到夏季重力波活动性逐渐增强, 从夏季到冬季, 重力波活动性逐渐减弱, 具有明显的夏季极大冬季小的季节变化性. 另外, 本文的重力波研究数据受激光雷达自身特点限制, 所包含的信息不够全面, 探索重力波季节性变化的根本原因还需要更多观测手段, 这有待进一步深入研究.

3　结论

利用激光雷达技术对北京地区上空 Na 层进行观测, 积累连续三年的夜间观测数据对重力波活动规律进行研究. 根据重力波的线性理论, 计算得到了北京地区上空大气密度扰动、空间功率谱及时间频率谱. 通过选择波长为 8, 4, 1.5, 1 km 以及波动周期为 60, 40, 25 min 的重力波辅助研究大气密度扰动的季节变化规律, 得到大气密度扰动具有夏季大, 冬季小, 峰值约出现在夏至时的结论, 平均大气密度扰动的均方根值为 5.8%. 通过加 Hamming 窗滤波平滑处理, 拟合得到垂直功率谱 p 值变化范围为 $-1.97\sim-3.67$, 年平均值为 -3.02. 频率谱的谱斜率 q 值分布范围为 $-1.06\sim-2.80$, 平均值为 -1.92. 该结论表明, 北京地区重力波活动规律与扩散滤波理论相符. 根据中国北方地区背景风场季节变化与水平纬向风场季节变化规律, 认为青藏高原的地形和对流因素以及背景风场的季节性规律是导致北京地区上空重力波活动季节性变化的主要原因.

致谢　分析数据得到了国家子午工程和北京延庆激光雷达台站的支持.

参考文献

[1] She C Y, Yu J R, Huang J W, *et al.* Na temperature lidar measurements of gravity wave perturbations of wind, density and temperature in the mesopause region [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(7):1329-1331

[2] Senft D C, Gardner C S. Seasonal variability of gravity wave activity and spectra in the mesopause region at Urbana [J]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(D9):17 229-17 264

[3] Gardner C S, Voelz D Z. Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois: 2. Gravity waves [J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A5):4673-4693

[4] Gardner C S. Diffusive filtering theory of gravity wave spectra in the atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(D10):20 601-20 622

[5] Gardner C S. Testing theories of atmospheric gravity wave saturation and dissipation [J]. *J. Atoms. Sol.-Terr. Phys.*, 1996, **58**:1575-1589

[6] Yang G, Clemesha B, Batista P, *et al.* Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at 23°S [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, D21107

[7] Zhang Tiemin, Wang Jihong, Fu Jun, *et al.* Study of sodium layer density over Haikou by lidar during the night of 4 May 2010 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(1):48-52. in Chinese (张铁民, 王继红, 傅军, 等. 2010 年 5 月 4 日夜间海口上空钠层密度的激光雷达观测研究 [J]. 空间科学学报, 2013, **33**(1):48-52)

[8] Yang G, Clemesha B, Batista P, *et al.* Improvement in the technique to extract gravity wave parameters from lidar data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: D19111

[9] Yang G, Clemesha B, Batista P, *et al.* Lidar study of the characteristics of gravity waves in the mesopause region at a southern low-latitude location [J]. *J. Atoms. Sol.-Terr. Phys.*, 2008, **70**(7):991-1011

[10] Tsuda T, Inoue T, Fritts D, *et al.* MST radar observations of a saturated gravity wave spectrum [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **46**(15):2440-2447

[11] Dewan E M. The saturated-cascade model for atmospheric gravity wave spectra and the Wavelength-Period (W-P) relations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**(9):817-820

[12] Hines C O. The saturation of gravity waves in the middle atmosphere: Part II. Development of Doppler-spread theory [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**(11):1360-1379

[13] Senft, D C, Hostetler C A, Gardner C S. Characteristics of gravity wave activity and spectra in the upper stratosphere and upper mesosphere at Arecibo during early April 1989 [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1993, **55**(3):425-439

[14] Collins R L, Nomura A, Gardner C S. Gravity waves in the upper mesosphere over Antarctica: lidar observations at the South Pole and Syowa [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **99**(D3):5475-5485

[15] Beatty T J, Hostetler C A, Gardner C S. Lidar observations of gravity wave and their spectra near the mesopause and stratopause at Arecibo [J]. *J. Atoms. Sci.*, 1992, **49**(6):477-496

[16] Gong S H, Yang G T, Xu J Y, *et al.* Statistical characteristics of atmospheric gravity wave in the mesopause region observed with a sodium lidar at Beijing, China [J]. *J. Atoms. Sol.-Terr. Phys.*, 2013, **97**:143-151

[17] Long R R. Some aspects of the flow of stratified fluids: III. Continuous density gradients [J]. *Tellus*, 1955, **7**(3):341-357

[18] Sato K. Small-scale wind disturbances observed by the MU radar during the passage of typhoon Kelly [J]. *J. Atoms. Sci.*, 1993, **50**(4):518-537

[19] Sato K. A statistical study of the structure, saturation and sources of inertio-gravity waves in the lower stratosphere observed with the MU radar [J]. *J. Atoms. Terr. Phys.*, 1994, **56**(6):755-774

[20] Smith R B. On severe downslope winds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**(23):2597-2603

[21] Tsuda T, Murayama Y, Nakamura T, *et al.* Variations of the gravity wave characteristics with height, season, and latitude revealed by comparative observations [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1994, **56**(5):555-568

[22] Alexander M, Pfister L. Gravity wave momentum flux in the lower stratosphere over convection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(15):2029-2032

[23] Farmer D, Armi L. Stratified flow over topography: The role of small-scale entrainment and mixing in flow establishment [J]. *Proc. R. Soc. London Ser.: A*, 1999, **455**(1989):3221-3258

[24] Wan W, Yuan, H, Ning B, *et al.* Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortexes around Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(20):3775-3778

[25] Xu G, Wan W, She C, *et al.* The relationship between ionospheric Total Electron Content (TEC) over East Asia and the tropospheric circulation around the Qinghai-Tibet Plateau obtained with a partial correlation method [J]. *Adv. Space Res.*, 2008, **42**(1):219-223

[26] Zhang, S D, Yi F. Latitudinal and seasonal variations of inertial gravity wave activity in the lower atmosphere over central China [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**:D05109